



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbge>



Análise Gamaespectrométrica para o Estudo de Domínios Hidrogeológicos no Sudoeste do Brasil

Carolina Cramer Almeida Marques Moura¹, Marcelo Antônio Nero², Luis Felipe Soares Cherem³

¹ Doutoranda em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) – Belo Horizonte, Minas Gerais, carolinacramer@gmail.com, ORCID: 0009-0009-4604-5240. ² Docente do Programa de Pós-graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), marcelo-nero@ufmg.br, ORCID: 0000-0003-2124-5018. ³ Docente do Programa de Pós-graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), lfcherem@ufmg.br, ORCID: 0000-0002-4119-6690.

Artigo recebido em 28/10/2024 e aceito em 16/01/2025

RESUMO

O estudo de dados gamaespectrométricos para a geologia de superfície produz o mapa ternário, composto por elementos radiométricos (K, U e Th) oriundos da medição de fontes de radiação de determinadas rochas. Tais estudos foram aplicados com o objetivo de analisar a interação geológica-geofísica dos dados gamaespectrométricos da Região Metropolitana de Belo Horizonte (MG) com os domínios hidrogeológicos dessa região. A metodologia empregada consistiu na manipulação dos dados aerogeofísicos, no mapeamento dos aspectos fisiográficos da região e, na acurácia do mapa temático geológico validado com auxílio do mapa de composição ternária. O mapa ternário RGB permitiu analisar as correlações dos radioelementos com as unidades litoestratigráficas que compõe os domínios hidrogeológicos, comprovando assim, comportamentos análogos às concentrações de potássio, urânio e tório frente aos aspectos fisiográficos. Assim, foi possível inferir que a interação geológica-geofísica tem relação direta com os comportamentos hidrogeológicos dos aquíferos concernentes na área de estudo. Deve-se ressaltar ainda que apesar da pouca penetrabilidade, a gamaespectrometria é, comprovadamente, uma ferramenta muito útil para caracterização de diferentes tipos litológicos, identificando possíveis novos alvos exploratórios e outras análises pertinentes.

Palavras-chave: Mapa ternário; comportamento hidrogeológico; Radioelementos; Geologia.

Gammaspectrometric analysis for the study of hydrogeological domains in Southwest Brazil

ABSTRACT

The study of gammaspectrometric data for surface geology produces the ternary map, composed of radiometric elements (K, U and Th) from the measurement of radiation sources in certain rocks. These studies were applied with the aim of analyzing the geological-geophysical interaction of the gamaspectrometric data from the Metropolitan Region of Belo Horizonte (MG) with the hydrogeological domains of this region. The methodology used consisted of manipulating the aerogeophysical data, mapping the physiographic aspects of the region and the accuracy of the geological thematic map validated with the aid of the ternary composition map. The RGB ternary map made it possible to analyze the correlations between the radioelements and the lithostratigraphic units that compose the hydrogeological domains, proving that the concentrations of potassium, uranium and thorium behave in a similar way to the physiographic aspects. Therefore, it was possible to infer that the geological-geophysical interaction is directly related to the hydrogeological behavior of the aquifers in the study area. It should also be noted that despite its low penetrability, gamma spectrometry has proven to be a very useful tool for characterizing different lithological types, identifying possible new exploration targets and other relevant analyses.

Keywords: Ternary map; Hydrogeological behavior; Radioelements; Geology.

Introdução

A circulação, distribuição e o movimento das águas no sistema terrestre estão condicionados às propriedades físico-químicas das mesmas e suas interações com o meio ambiente. Mais precisamente, as águas subterrâneas apresentam um comportamento hidrogeológico com características notórias aos aspectos fisiográficos concernentes à área de estudo. Nesse ínterim, os estudos de dados gamaespectrométricos assomam-se aos estudos das águas por meio da caracterização dos elementos radiométricos que, segundo Ribeiro *et al.* (2013), estão relacionadas às unidades litológicas específicas de cada região. Assim, a compreensão geológica associada à caracterização dos elementos também permite análises geoquímicas para a área explorada.

Cordeiro e Pereira (2021) explicitam a eficácia do método de aerogamaespectrometria na identificação de diferentes rochas por meio da radioatividade natural emitida, sendo aplicada em estudos geológicos, de solos, ambientais, e de prospecção mineral. No qual fundamenta-se no decaimento natural dos radioelementos K, Th e U encontrados na superfície terrestre (AURELIANO E GHILARDI, 2024). Podendo ser utilizado em áreas extensas a baixo custo (PURIFICAÇÃO *et al.*, 2016).

Apesar da desvantagem em relação ao baixo alcance de profundidade, a gamaespectrometria é relevante em suas características geoquímicas, de cristalografia e de concentração dos elementos radiométricos, restringindo-se a dados geológicos superficiais e/ou afloramentos de uma formação (RIBEIRO *et al.*, 2013). O conhecimento do alcance geológico e hidrogeológico subterrâneo compreendem desde a formação da terra, qualidade e disponibilidade dos recursos hídricos subterrâneos até a gestão e proteção dos recursos hídricos (YEVALLA *et al.*, 2024).

Considerando-se o estado da arte, bem como pesquisas recentes e com emprego de gamaespectrometria e/ou estudos hidrogeológicos, vale a pena destacar os seguintes trabalhos: 1) Aureliano e Ghilardi (2024) relatam pesquisa sobre o mapeamento da Borda Sul-Sudeste da Bacia do Araripe (localizada na fronteira entre os estados de Pernambuco, Piauí e Ceará, no Nordeste do Brasil) com auxílio de gamaespectrometria e magnetometria, onde ao final evidenciou-se que a Formação Romualdo possui uma extensão ao sul superior comparando-se com trabalhos anteriores, estendendo-se ao longo do sopé da chapada com

orientação aproximadamente E-W; 2) Casagrande *et al.* (2024) utilizaram a gamaespectrometria para avaliar os impactos ambientais da agricultura intensiva em termos de mobilidade geoquímica no solo e nas águas, sendo considerado um método inicial de triagem rápida em áreas úmidas sob outros contextos climáticos e geológicos/pedológicos para avaliar a dinâmica hidrogeoquímica local e os impactos da agricultura; 3) Bessa e Campos (2023) publicaram a pesquisa correspondente à perda de captações subterrâneas e monitoramento e avaliação hidrogeológica em áreas afetadas pelo enchimento e operação de reservatórios de hidrelétricas, onde os autores concluíram que a aplicação de uma estratégia metodológica é um importante caminho no domínio de informações de modo a proporcionar melhorias na eficácia e eficiência das tarefas que visam à interpretação do comportamento decorrente da elevação artificial do nível freático, os quais são pouco conhecidos e desconsiderados na maioria das pesquisas; 4) Carvalho *et al.* (2023) realizou a avaliação da potenciometria e identificação de divisores hidrogeológicos do Sistema Aquífero Urucuia Central (Oeste do estado da Bahia) com uso de Interpolação por *Krigagem*, onde concluiu-se que as ocorrências dos divisores hidrogeológicos impactam no conceito da potenciometria decrescente predominante para leste e criando-se o conceito de sub-bacias hidrogeológicas com fluxo divergente, bem como seguindo parcialmente o fluxo dos maiores corpos hídricos de expressão regional; 5) Dutra (2024) utilizaram dados aéreos de gamaespectrometria que indicaram correlações espaciais com altos valores de razões radiométricas e densidade de morfolineamentos, sendo que ao final destacou a importância do uso de múltiplos geocronômetros e química mineral para desvendar a gênese do minério e o histórico de mobilização.

Vale ainda destacar tantas outras referências que tratam do tema em questão da presente pesquisa, tais como em Silva *et al.* (2019), D’Affonseca *et al.* (2020), Martins *et al.* (2020), Mendonça *et al.* (2020), Lachassagne *et al.* (2021), Macedo Filho *et al.* (2021), Valões *et al.* (2022), Ben Saad *et al.* (2023), Jimenez-Martinez (2023), Ayer *et al.* (2024), Briganti *et al.* (2024), Kinoti *et al.* (2024), Marques *et al.* (2024), Novikov *et al.* (2024), Peach e Taylor (2024), Vincent *et al.* (2024), Borges *et al.* (2025), Brito *et al.* (2025), Shibetskaia *et al.* (2025) Chicri *et al.* (2025), Felix *et al.* (2025), Gusarov *et al.* (2025), Lupinacci *et al.* (2025), Martins *et al.* (2025), Neves *et al.* (2025), Nunes *et al.* (2025), Silva *et al.* (2025), Sperandio *et al.* (2025), entre outros.

A hipótese central deste estudo é que as variações na distribuição dos radioelementos podem ser utilizadas como indicadores de características litológicas e hidrogeológicas, fornecendo uma abordagem eficaz para a caracterização e exploração de novos alvos geológicos e hidrogeológicos, apesar das limitações de penetrabilidade da técnica gamaespectrométrica.

Na sequência é apresentado o objetivo geral, a área de estudo com as características relevantes para a presente pesquisa, os materiais e métodos que incluem os dados aerogeofísicos, o mapeamento dos aspectos fisiográficos e a análise da acurácia temática do mapa geológico.

Objetivo

O objetivo principal da presente pesquisa foi analisar a interação geológica-geofísica coexistente nos domínios hidrogeológicos na RMBH (Região Metropolitana de Belo Horizonte).

Material e métodos

Área de Estudo

A área de estudo está localizada no Sudoeste do Brasil, conhecida como Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) na porção Central do Estado de Minas Gerais (Figura 1).

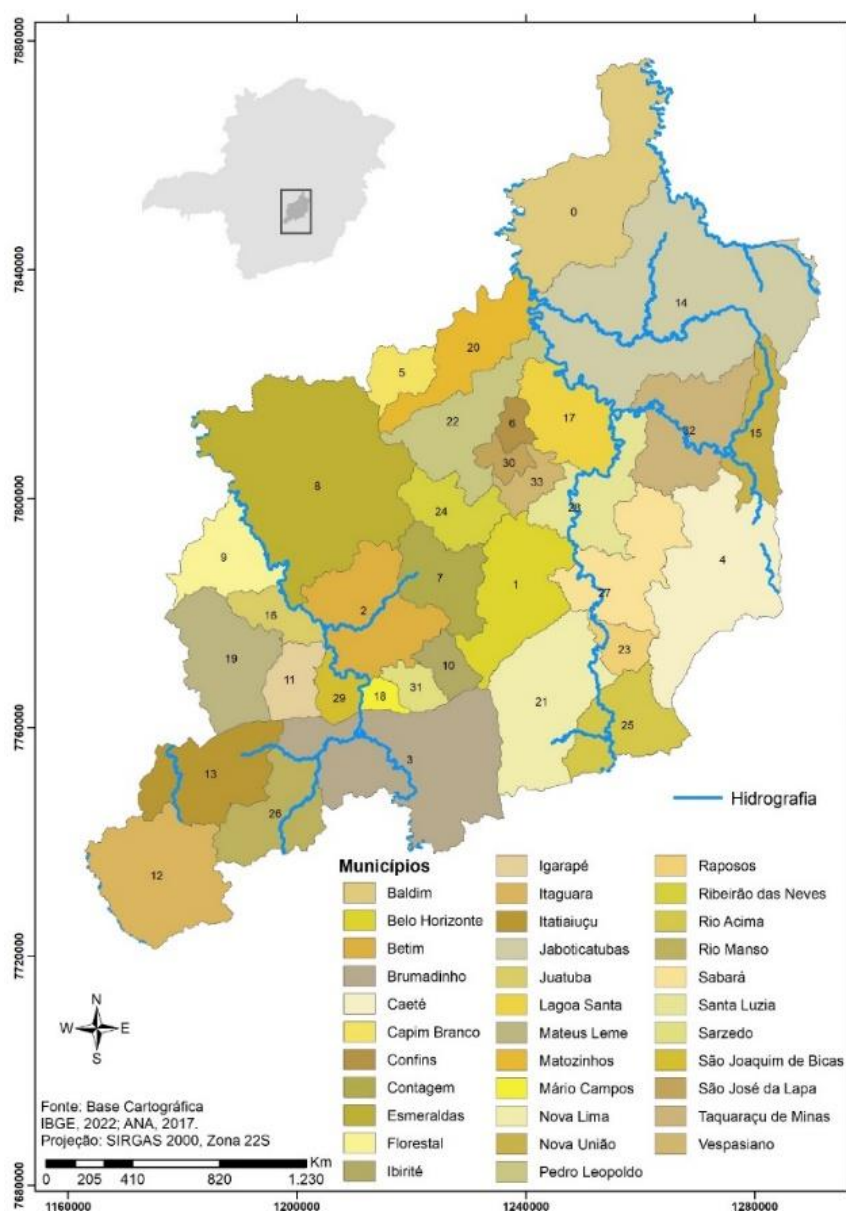


Figura 1. Mapa dos municípios da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH)/MG

A capital Belo Horizonte é citada no Atlas da ANA (2021) como uma das principais cidades que padecem no âmbito de insegurança hídrica com o crescimento urbano frente aos mananciais e reservatórios de abastecimento. As principais fontes de abastecimento da RMBH são provenientes dos rios Paraopeba e das Velhas, afluentes do Rio São Francisco.

Os 34 municípios que compõe a RMBH são responsáveis por ser a terceira maior aglomeração urbana do Brasil com um abastecimento majoritariamente superficial e, apontam uma vulnerabilidade para demandas futuras (ANA, 2021).

Interações geológicas-geofísicas

Conforme a Copasa (2016), a área de estudo compreende as seguintes unidades hidrogeológicas descritas:

- Embasamento Cristalino: com uma espessura média não-definida; com aquíferos do tipo Fraturados das rochas dos Complexos Granítico-Gnássico-Migmatítico; e ocorrem de forma predominantemente e dispersos por toda RMBH.
- Quadrilátero Ferrífero: com uma espessura média de 200 metros, com os aquíferos do tipo Fraturados, fissuro/cársticos e cárstico (Formação Gandarela). Também com uma espessura média de 250 a 300 metros, com os aquíferos do tipo Fraturados e porosos (Formação Cauê). Ambos restritos à Região Sul da RMBH.
- Grupo Bambuí/ Carste: com uma espessura média de 500 a 600 metros, com os aquíferos do tipo Fraturados, fissuro/cársticos e os aquíferos cársticos da Formação Sete Lagoas, Membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa. Restritos à porção Norte da RMBH.

Os aquíferos, segundo Santos *et al.* (2017), são formações geológicas que podem apresentar uma certa permeabilidade com a capacidade de armazenar e transmitir água. Essa transmissão ocorre através dos poros ou fissuras encontradas na geologia específica do local.

O Embasamento Cristalino apresenta uma potencialidade hidrogeológica fraca a mediana, considerando apenas as demandas localizadas, em razão de uma certa complexidade e imprecisão em estimar as reservas. Gonçalves *et al.* (2024) caracteriza o domínio hidrogeológico cristalino como um domínio no qual a água percorre um caminho até ser armazenada nas fraturas ou descontinuidades. Esse traçado preferencial das águas estão relacionados a zonas com maior concentração de fraturas, tamanhos, aberturas e interconexões entre as mesmas. O Grupo Bambuí/Carste também retrata uma complexidade em relação a estimativa de reservas dos aquíferos cársticos.

Sendo assim, a compreensão dos domínios hidrogeológicos da RMBH será possível nesse estudo através da análise dos dados gamaespectrométricos disponíveis.

A técnica de sensoriamento remoto aerogamaespectrometria é baseada em medir a concentração dos raios gama de potássio (K), urânio (eU) e tório (eTh) emitidos pela superfície. No entanto, essa medição da intensidade dos raios varia conforme alguns aspectos superficiais, como a heterogeneidade geológica, a composição mineral, a natureza e o tipo de intemperismo por exemplo (ECHEVERRIA HERRERA *et al.*, 2020).

O Quadro 1 compreende os principais aspectos do potássio, urânio e tório na natureza.

Quadro 1. Principais características dos elementos radiométricos (K, U e Th). Fonte: Autores, 2025

ELEMENTO RADIOMÉTRICO	PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS	ROCHAS COM MAIOR TEOR	OUTRAS INFORMAÇÕES
POTÁSSIO (K)	Principal ocorrência do K em associações minerais se dá nos feldspatos potássicos. Ocorre também em micas, em alguns argilominerais. O potássio apresenta alta mobilidade durante o intemperismo e em ambientes de alteração hidrotermal, principalmente ambientes de clima tropical a subtropical. Média de 1,50% ao longo da crosta continental.	São as rochas ígneas félsicas (granitóides e sienitóides), seus equivalentes vulcânicos, e rochas metamórficas micáceas, feldspáticas e quartzo-feldspáticas (filitos, xistos e gnaisses). Constituinte importante de rochas sedimentares (folhelhos e argilitos).	Não são observadas ocorrências de potássio entre os minerais mais abundantes da crosta continental, como quartzo, olivinas, cloritas e carbonatos.
URÂNIO (U)	Sua concentração maior na parte superior da crosta (2,7 ppm) do que na inferior (0,2 ppm). Menos móvel do que o potássio e pode formar minerais solúveis. Estão presentes em pegmatitos, sienitos, carbonatitos, granitos, gnaisses e alguns folhelhos.	Presente em minerais acessórios, de variadas rochas ígneas e metamórficas quartzo-feldspáticas.	Sobre o teor médio dos radioelementos nas rochas ígneas há uma tendência de aumento da quantidade destes em função do teor de sílica, ou seja, rochas félsicas possuem um teor mais elevado de radioelementos do que rochas máficas ou ultrabásicas. O tório geralmente apresenta um crescimento maior do número de contagens em função do teor de sílica comparativamente ao urânio, o que torna possível utilizar a razão entre esses elementos (Th/U) para investigar o grau de diferenciação dentro de uma suíte ígnea.
TÓRIO (Th)	Pode atingir teor de até 10,5 ppm na parte superior enquanto que na parte inferior, bem mais exaurida, a concentração de tório é de aproximadamente 1,2 ppm. Menos móvel do que o potássio.	Pode estar presente nos seguintes minerais: alanita, monazita, xenotima e zircão (superiores a 1000 ppm) ou como vestígios em outros minerais formadores de rochas. Também em minerais acessórios, de variadas rochas ígneas e metamórficas quartzo-feldspáticas.	

A caracterização dos elementos radiométricos estão relacionadas às unidades litológicas específicas de cada região, sendo que a compreensão geológica associada à caracterização dos elementos permite análises geoquímicas e geofísicas para a área explorada. A Moura, C. C. A. M., Nero, M. A., Cherem, L. F. S.

gamaespectrometria apresenta dados superficiais, com baixo alcance em relação à profundidade (Ribeiro *et al*, 2013).

Dados Aerogeofísicos

Os dados aerogeofísicos referentes a gamaespectrometria foram obtidos da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) por meio das empresas contratantes: SEME - Secretaria de Estado de Minas e Energia do Governo de Minas Gerais, SGB - Serviço Geológico do Brasil (CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais) DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral, CODEMIG - Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais e, ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. E as empresas contratadas: Lasa Engenharia e Prospecções S.A., Prospectors Aerolevantamentos e Sistemas LTDA., Prospecc S/A, Megafísica Survey Aerolevantamentos S.A. e, GEOMAG S.A. - Prospecções Aerogeofísicos.

Os projetos aerogeofísicos são: Área 2 (Bloco Oeste), Área 2 (Bloco Leste), Área 3, Área 10, Área 11A, RV (Blocos I – IV), RV (Blocos II – III) e, Itabira-Ferros.

Os mapas ternários foram disponibilizados no início do ano de 2019 pela CPRM.

Mapeamento dos aspectos fisiográficos

Foram realizados os mapeamentos necessários para as análises propostas com a utilização do software ARCGIS 10.8 (ESRI, 2016). A fonte dos municípios é do IBGE censo 2022, a base hidrográfica é otocodificada 2017/5k do trecho de drenagem da ANA de 2017, os domínios hidrogeológicos é da CPRM de 2007 e, as bases

geológicas é da CPRM de 2019, conforme disponibilizados nos respectivos sites.

Análise da acurácia temática

Foody (2020) aborda a dificuldade de se interpretar o coeficiente *kappa* devido aos seus efeitos de prevalência na precisão e comparação de mapas temáticos oriundos por meio de classificação de imagens, indicando-o como um coeficiente de concordância além do acaso. A estimativa do coeficiente *kappa* é obtida por meio da matriz de confusão e, posteriormente, utilizada para avaliar a precisão da classificação.

Segundo Silva (2014) o mapa ternário RGB composto pelos três radioelementos (K, eTh, eU), apresenta os contatos litológicos baseados na geologia local. Sendo uma importante ferramenta para a validação temática dos traçados geológicos, apresentados aqui como unidades litoestratigráficas.

Assim, as informações contidas no mapa de composição ternária validam e auxiliam o traçado destes contatos geológicos, nos quais correlaciona com os litotipos encontrados no mapa geológico com a resposta radiométrica do mapa ternário. Não sendo pertinente o uso do coeficiente *kappa* para validação temática.

Fluxograma da metodologia

O fluxograma (Figura 2) apresentam os procedimentos metodológicos empregados neste trabalho.

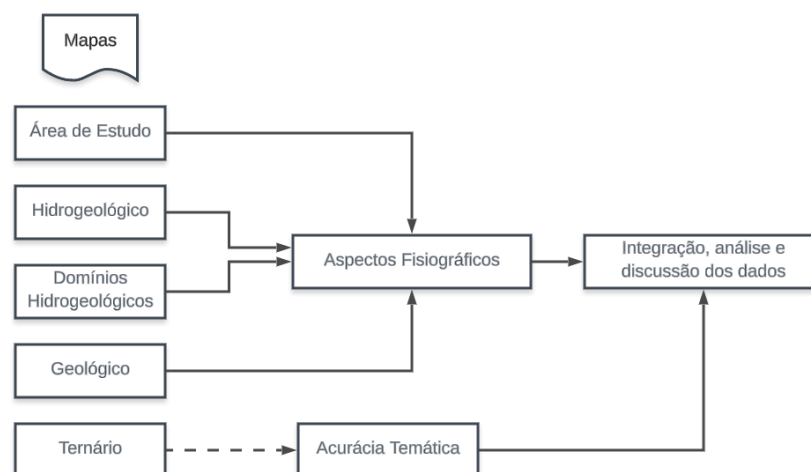


Figura 2. Fluxograma metodológico. Fonte: Autores, 2025.

Resultados

A geologia da RMBH foi embasada no mapa geológico geofísico da CPRM (Figura 3).

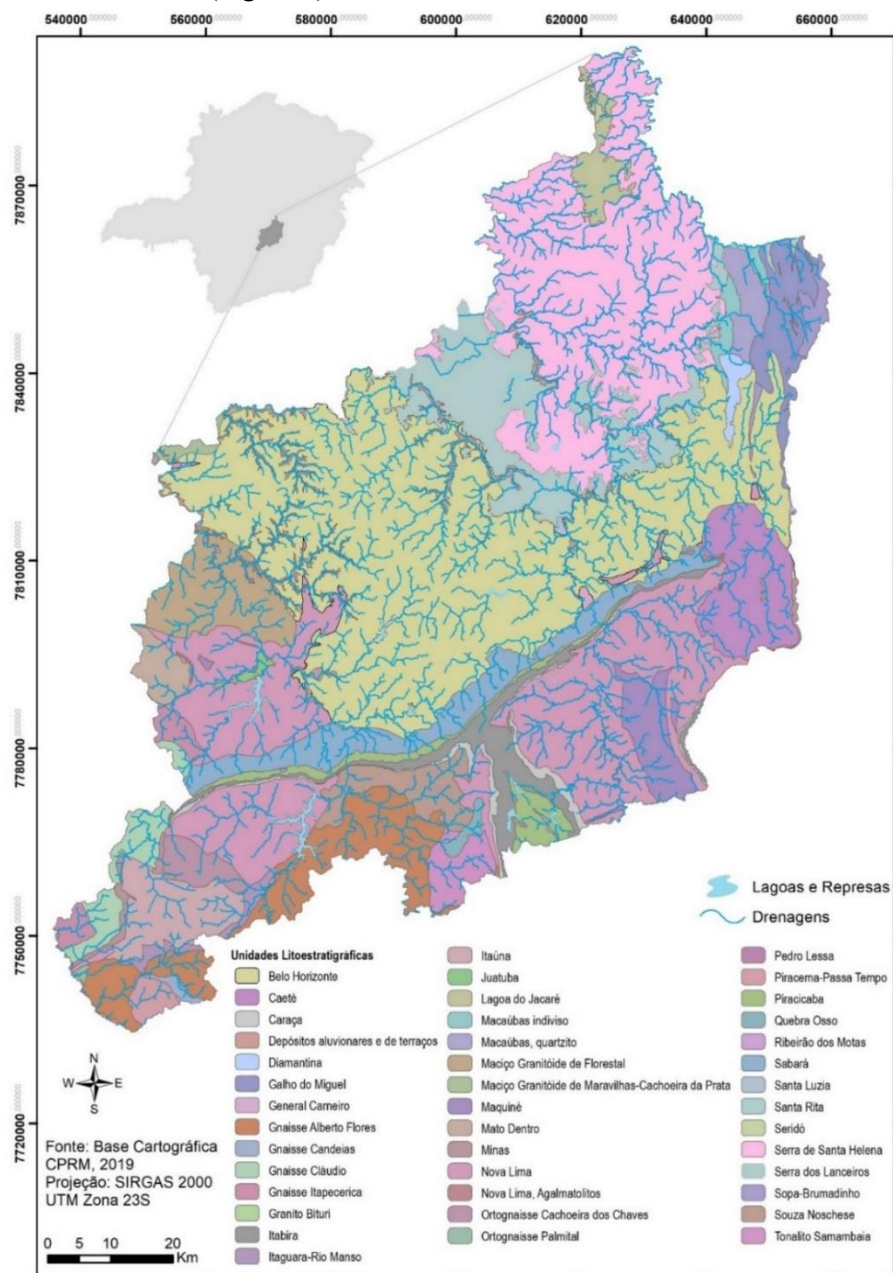


Figura 3. Mapa geológico da RMBH. Fonte: Autores, 2025.

Segundo Sotero *et al.* (2019) as unidades litoestratigráficas da RMBH são classificadas conforme descritas abaixo:

- Cenozóico: Formação Juatuba: depósitos sedimentares semi-consolidados; Depósitos aluvionares e de terraços: material argilo-arenoso semi-consolidado.
- Neoproterozóico: Grupo Macaúbas: litofácies quartzito; Grupo Macaúbas indiviso: xisto,

formação ferrífera, metamáfica, metaultramáfica, calcissilicática, metadiamictito e quartzitos; Suíte Pedro Lessa: rochas metabásicas na forma de diabásios até gabros; Formação Serra da Saudade: siltitos, siltitos argilosos e folhelhos; Formação Lagoa do Jacaré: alternância de calcários oolíticos e pisolíticos; Formação Serra de Santa Helena: folhelhos e siltitos; Formação Sete Lagoas: rochas

Moura, C. C. A. M., Nero, M. A., Cherem, L. F. S.

argilo-carbonáticas em sequência composta por calcários, dolomitos, margas e pelitos.

- Mesoproterozóico: Formação Sopa-Brumadinho: quartzito, filito hematítico, metapelito, xisto, metaconglomerado, níveis carbonáticos e níveis fosfáticos; Grupo Diamantina: Metassedimentos clásticos; Formação Santa Rita: constituída essencialmente por pelitos e subordinadamente por quartzitos de granulação fina; Formação Galho do Miguel: quartzitos puros.

- Paleoproterozóico: Grupo Itabira: formações ferríferas bandadas; Grupo Caraça: quartzitos; Super grupo Minas: metassedimentos clasto-químicos; Suíte Itaguara-Rio Manso: suíte ultramáfica-máfica; Grupo Sabará: metapelito, metadiamictito, metagrauvaca, ou micaxisto, xisto; Grupo Piracicaba: rochas metas sedimentares clásticas.

- Arqueano: Corpo Itaúna: tonalitos e migmatito; Unida de Ortognaisse Palmital: gnaisses de aspecto xistoso; Unida de Gnaiss Itapecerica: gnaisses TTGs bandados; Unida de Gnaiss Cláudio: gnaisses TTGs bandados, migmatitos e granitóides cinzas; Grupo Maquiné: quartzitos que transicionam a quartzo-sericita xisto na base e quartzito sericítico; Grupo Nova Lima: xistos verdes metassedimentares e metavulcânicos; Litofácies Agalmatolito: Hidrotermalito peraluminoso; Grupo Quebra Osso: metakomatiitos peridotíticos; Unidade Gnaiss Candeias: Sequência de gnaisses esverdeados; Unida de Gnaiss Alberto Flores: gnaiss tonalítico bandado; Complexo Piracema-Passa Tempo: leucogranitos branco-esverdeado, do tipo TTG; Complexo Belo Horizonte: gnaisses TTGs bandados e migmatitos;

Corpo General Carneiro: leucogranito branco; Corpo Ortognaisse Cachoeira dos Chaves: Ortognaisse tonalítico; Corpo Santa Luzia: leucogranito maciço; Corpo Maciço Granitóide Florestal: granodiorito e granito; Corpo Batólito Pequi: biotita granodiorito a tonalito; Corpo Souza Noschese: gnaiss tonalítico bandado; Suíte Ribeirão dos Motas: metaperidotito; Suíte Mato Dentro: granitoides biotíticos; Corpo Tonalito Samambaia: leucogranitos; Complexo Caeté: granitoides tonalíticos; Corpo Granito Bituri: monzogranito; Supergrupo Rio das Velhas: sequência metavulcanosedimentar.

Já as unidades hidrogeológicas da RMBH (Figura 4) são classificadas em três tipos: Embasamento Cristalino, Quadrilátero Ferrífero e Grupo Bambuí/Carste. O Embasamento Cristalino possui uma espessura média não determinada, formada por aquíferos fraturados das rochas do Complexo Granítico-Gnáissico-Migmatítico, predominante e dispersos na RMBH (COPASA, 2016).

A geomorfologia do Quadrilátero Ferrífero apresenta cristas e platôs elevados, escarpas íngremes, cânions profundos e vales encaixados (LOPES *et al*, 2021). Apresentando uma espessura média de 200 metros os aquíferos fraturados, fissuro/cársticos e cársticos (Formação Gandarela), e de 250 a 300 metros os aquíferos fraturados e porosos (Formação Cauê), com ocorrência na porção sul da RMBH. E o Grupo Bambuí/Carste tem uma espessura média de 500 a 600 metros, formado por aquíferos fraturados, fissuro/cársticos e cársticos da Formação Sete Lagoas, ocorrendo ao norte da RMBH (COPASA, 2016).

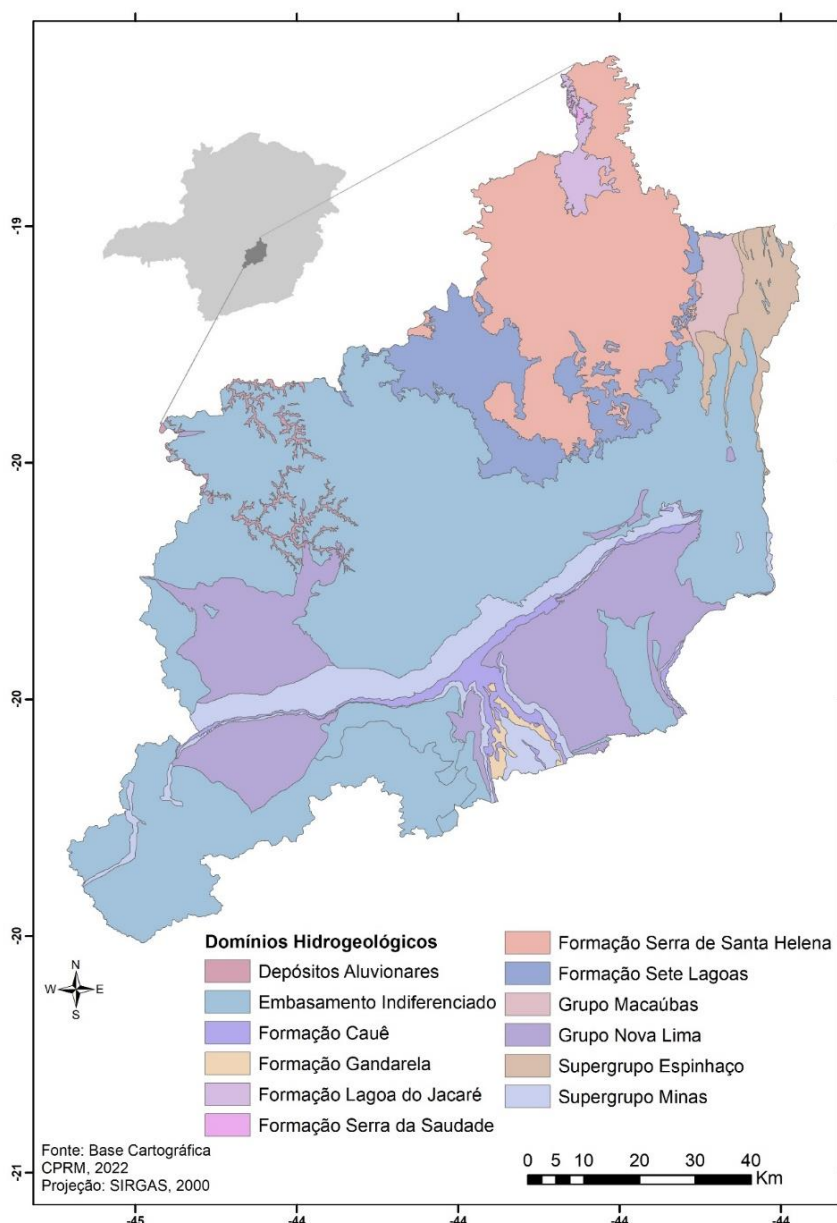


Figura 4. Mapa das unidades litológicas que compõe os domínios hidrogeológicos da RMBH. Fonte: Autores, 2025.

As composições litológicas da rocha definem um determinado grupo de unidades geológicas com afinidades hidrogeológicas denominado domínio hidrogeológico. No Brasil há 7 (sete) grandes domínios hidrogeológicos oriundos

de agrupamentos das unidades geológicas, são eles: Cristalino, Aluviões, Carbonatos/Metacarbonatos, Formações cenozóicas indiferenciadas, Metassedimento/Vulcânica, Poroso/Fissural e, Vulcânica (Figura 5).

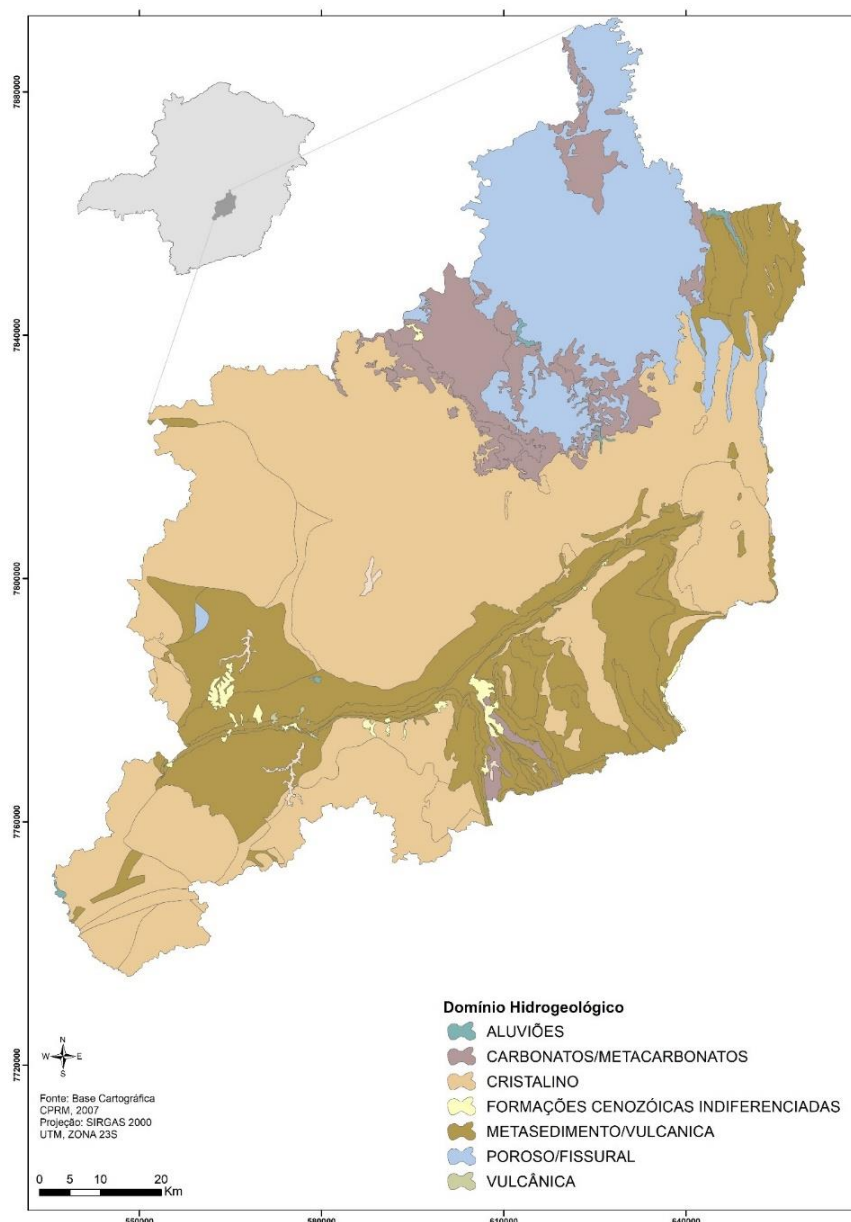


Figura 5. Mapa dos 7 domínios hidrogeológicos da RMBH. Fonte: Autores, 2025.

As unidades litoestratigráficas e, consequentemente os domínios hidrogeológicos, apresentam forte relação com a disposição dos elementos radiométricos no solo ($eTh/Kperc/eU$). Já que os radioelementos se concentram em maior ou menor teor conforme o tipo da rocha.

Os elementos foram analisados por meio dos mapas ternários relativos as concentrações de cada

elemento radiométrico (Figura 6) disponibilizado pela CPRM, com os padrões de RGB (Red, Green, Blue). Conforme Ribeiro et al (2013), o mapa ternário com o padrão RGB correlaciona o potássio (K em %), tório (Th em ppm) e urânio (U em ppm) com as cores vermelho, verde e azul respectivamente.

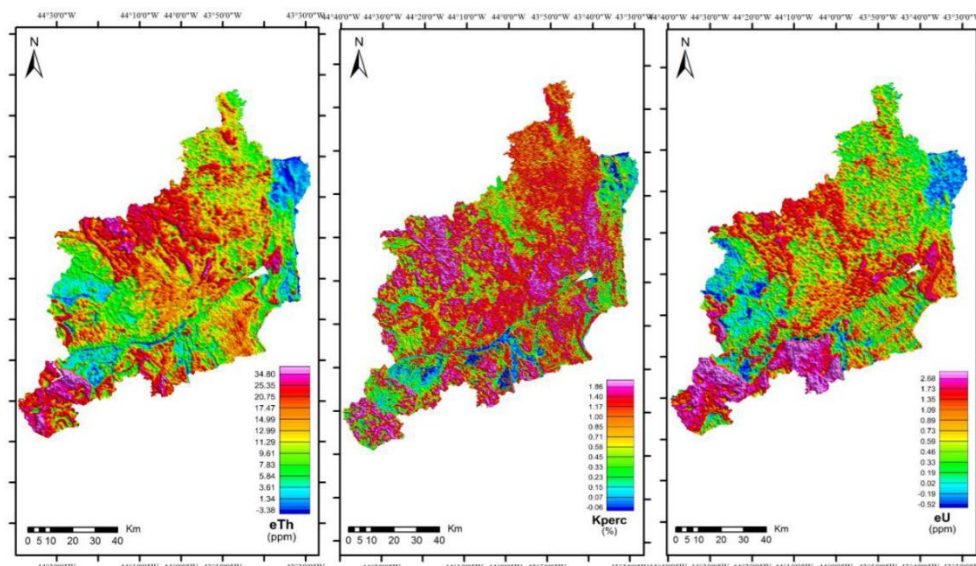


Figura 6. Mapa de contagens dos elementos radiométricos. Fonte: Autores, 2025.

O mapa ternário (RGB) (Figura 7) demonstra a distribuição dos elementos radiométricos ao longo do eixo norte-sul da RMBH. Há uma predominância do percentual de potássio em toda a região de estudo, com uma menor

hegemonia na porção sul. No mapa RGB o urânio apresenta-se ao sul, sul-sudeste, leste-nordeste e a noroeste, sendo que os traços das cores presentes também denotam a presença do tório. A principal concentração do urânio se encontra a leste e a sul-sudoeste, e do tório a sudoeste da RMBH.

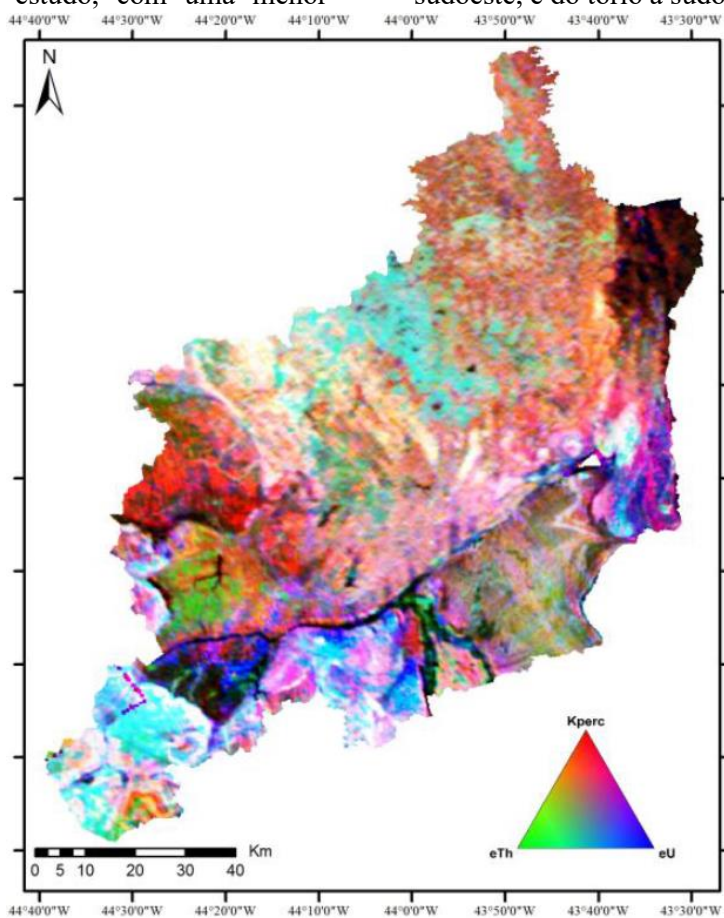


Figura 7. Mapa ternário (RGB) da RMBH. Fonte: Autores, 2025.

Conforme Silva (2014), o mapa de composição ternária RGB (K, eTh, eU) e a interpretação das unidades litroestratigráficas da

RMBH (Figura 8) podem ser utilizados para a validação das informações apresentadas no mapa geológico.

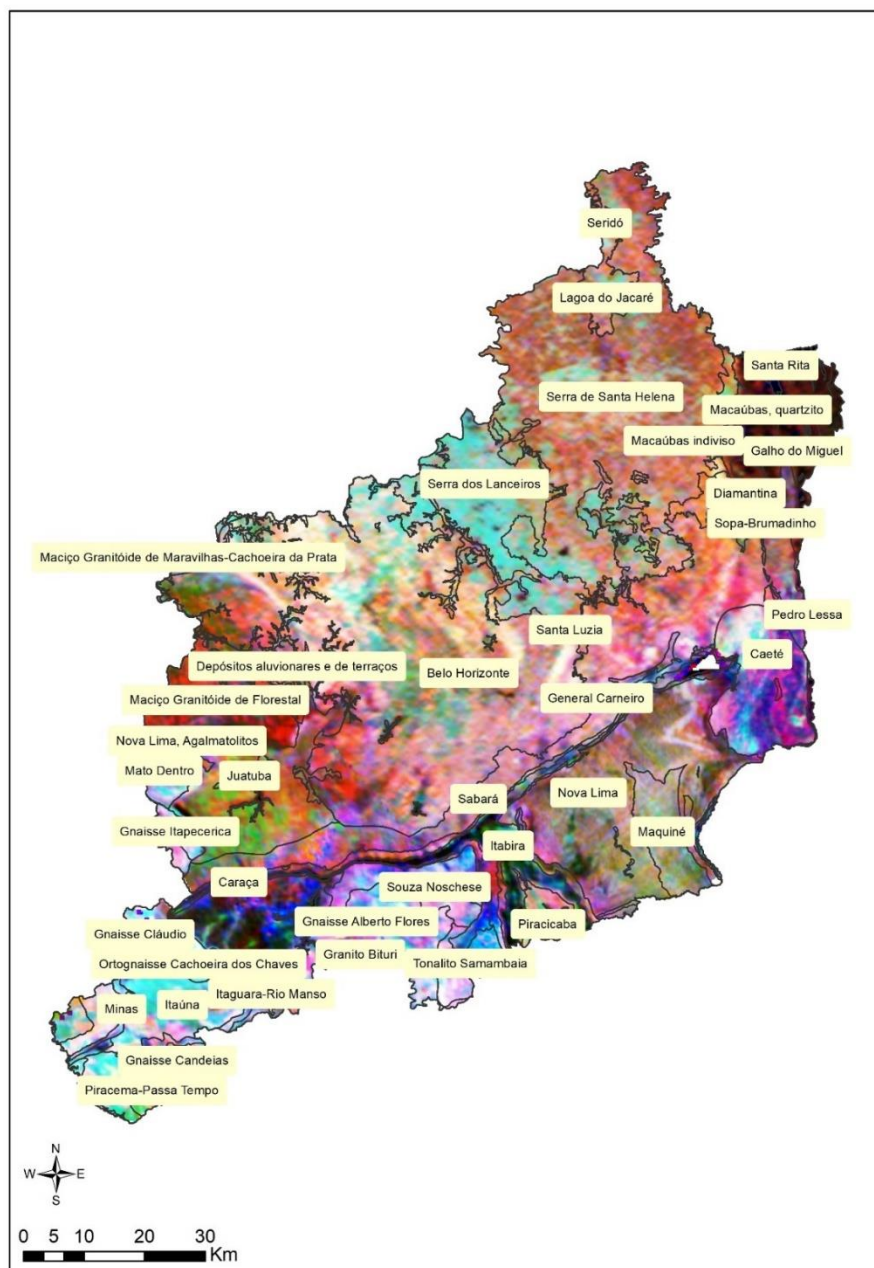


Figura 8. Mapa de interpretação da composição ternária RGB (K, eTh, eU) e mapa geológico. Fonte: Autores, 2025.

O mapa ternário RGB e o mapa das unidades litológicas que compõe os domínios hidrogeológicos da RMBH (Figura 9) serão

utilizados para comparação ao mapa geológico frente aos domínios hidrogeológicos e a resposta gamaespectrométrica.

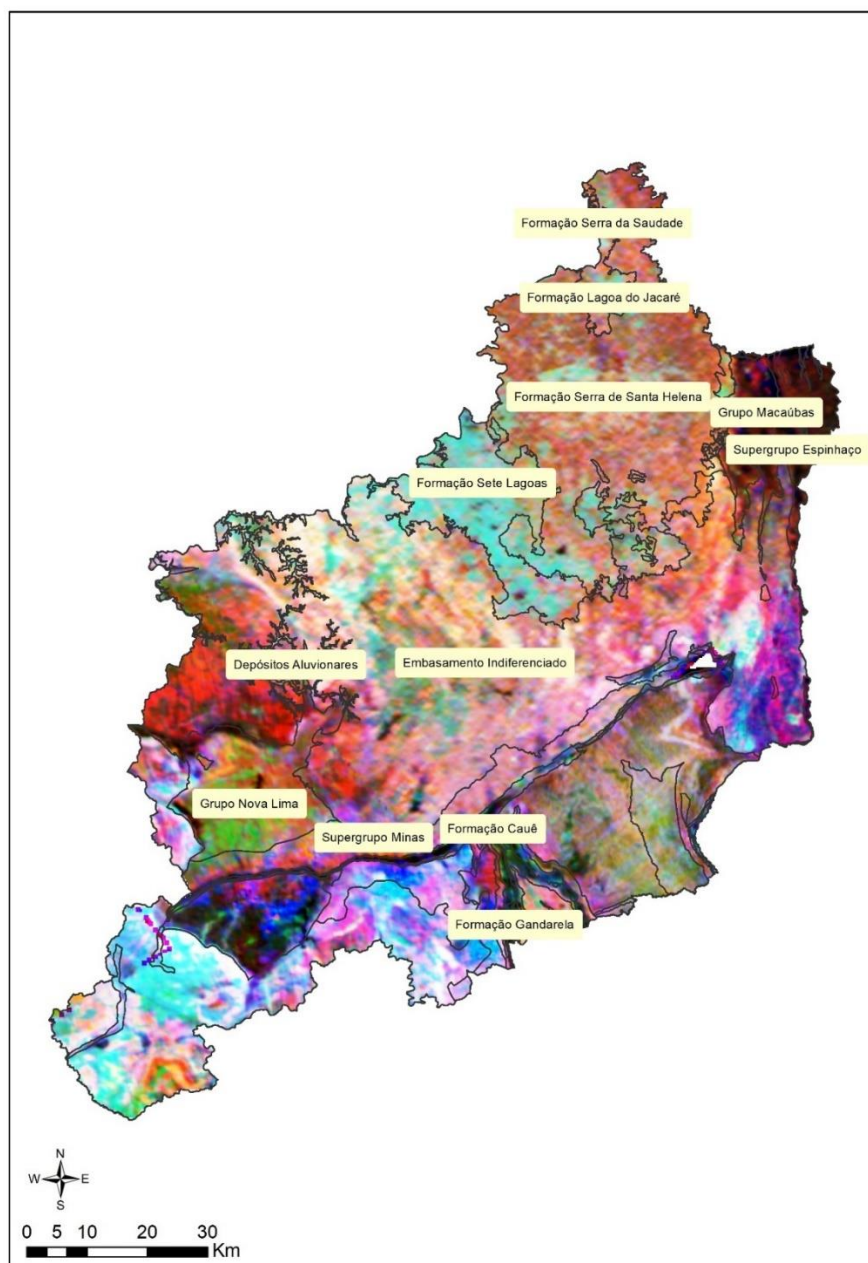


Figura 9. Mapa de composição ternária RGB (K, eTh, eU) e mapa de domínios hidrogeológicos. Fonte: Autores, 2025.

Discussão

Os procedimentos metodológicos empregados neste trabalho permitiram o desenvolvimento dos dados no tópico anterior e, agora, será realizada a discussão e interpretação desses dados gerados.

Na análise gamaespectrométrica, ao comparar o mapa ternário (RGB) dos elementos radiométricos (eTh/Kperc/eU) com os aspectos fisiográficos da RMBH, é possível analisar a

resposta radiométrica das principais estruturas e contatos geológicos da área estudada. Essa interação geológica-geofísica testifica, por exemplo, comportamentos hidrogeológicos dos aquíferos concernentes a RMBH para futuras pesquisas. No mapa ternário RGB a partir do diagrama terciário, é possível estabelecer algumas a porcentagem de cada elemento radiométrico por meio das faixas que compõe os canais individuais. A interpretação de algumas regiões distintas segue abaixo com suas proporções aproximadas:

- Porção Norte: Kperc~50%, eU~30%, eTh~20%

- Porção Noroeste: Kperc~30%, eU~40%, eTh~30%
- Porção Oeste: Kperc~60%, eU~30%, eTh~10%
- Porção Leste: Kperc~40%, eU~50%, eTh~10%
- Porção Sudoeste: Kperc~10%, eU~30%, eTh~60%

Os pesos de cada elemento têm relação direta com a litologia local abordada. Ao norte do mapa de composição ternária RGB (K, eTh, eU) e mapa geológico (Figura 7) tem-se majoritariamente a Serra de Santa Helena (constituída de folhelhos e siltitos), e a Serra dos Lanceiros (da Formação Sete Lagoas: rochas argilo-carbonáticas em sequência composta por calcários, dolomitos, margas e pelitos). Assim, conforme o Quadro 1 das principais características dos elementos radiométricos (K, U e Th), essa região apresenta uma porcentagem maior de potássio e tório conforme testifica o mapa de interpretação ternária. Ambos pertencentes ao Supergrupo São Francisco, Grupo Bambuí.

A nordeste tem-se em maior parte o Grupo Nova Lima (xistos verdes metassedimentares e metavulcânicos e intercalações de filito, quartzito, grauvaca, dolomito e formação ferrífera) e o Grupo Caeté (granitoides tonalíticos). Correlacionando o Grupo Nova Lima com uma porcentagem mediana entre o tório e o potássio, e o Grupo Caeté entre potássio e urânio.

A sudeste, no qual localizam-se as serras com elevadas altimetrias do Quadrilátero Ferrífero, tem-se rochas constituintes dos Grupos Nova Lima e Itabira (filito, dolomito e itabirito; metavulcano-sedimentar). Há uma incidência moderada de urânio e tório, nos quais apresentam uma mobilidade reduzida durante o intemperismo se relacionados ao potássio. A coloração preta infere-se a baixos teores de potássio, urânio e tório.

Ao sul será apontado apenas algumas litologias, sendo o Corpo Itaúna (tonalitos e migmatito), Corpo Ortognaisse Cachoeira dos Chaves (Ortognaisse tonalítico), Unidade Gnaisses Candeiais (Sequência de gnaisses esverdeados). Verificando-se um maior teor de urânio seguido de tório. A porção com coloração esbranquiçada infere-se a altos teores de tório, potássio e urânio.

Ao sudoeste incluem o Complexo Belo Horizonte (gnaisse TTGs bandados e migmatitos) e Depósitos Aluvionares e de Terraços (material argilo-arenoso semi-consolidado de cores

variadas). Areia fina a grossa, com níveis de cascalho arredondado e mal selecionado, e argila). Em ambos há um maior teor de potássio seguido de um menor teor de tório.

E a central tem-se o Complexo Belo Horizonte, o maior em extensão na RMBH, composto por gnaisses TTGs bandados e migmatitos, com intrusões de granitóides potássicos mais novos e frequentes enclaves máficos. Com alto teor de potássio e um menor teor de tório.

Os limites estão, em sua maioria, em concordância com as unidades litroestratigráficas. Essa correlação entre os litotipos de cada unidade geológica com a resposta radiométrica do mapa ternário comprovam a acurácia temática do mapa geológico. Outras técnicas poderiam ser utilizadas para a análise da acurácia, como por exemplo a utilização de drones, sendo sugestivo para outras pesquisas.

Conclusões

Nas análises gamaespectrométricas a caracterização dos elementos radiométricos estavam diretamente relacionadas as unidades litológicas específicas de cada região. As contagens dos teores de potássio, tório e urânio demonstraram a presença de rochas pertinentes aos elementos radiométricos e comportamentos análogos, como por exemplo, a capacidade de mobilidade ou não dos mesmos para baixas altimetrias. O mapa ternário (RGB) evidenciou a unidade hidrogeológica predominante (Embasamento Cristalino), bem como as unidades litroestratigráficas de toda a RMBH, testificando comportamentos análogos as concentrações de potássio, urânio e tório frente aos aspectos fisiográficos, e, reiterando a acurácia temática do mapa geológico por meio do mapa ternário.

Também é possível inferir que a interação geológica-geofísica tem relação direta com os comportamentos hidrogeológicos dos aquíferos concernentes a RMBH. Guardando alta correlação a estudos futuros sobre os comportamentos hidrogeológicos de uma região, bem como a utilização sustentável dos recursos hídricos, sua proteção e o monitoramento de sua qualidade, disponibilidade e susceptibilidade a contaminação.

Apesar da pouca penetrabilidade (inferiores a 40cm) e algumas discrepâncias nos limites das unidades geológicas devido a dispersão

natural dos radioelementos, a gamaespectrometria é, comprovadamente, uma ferramenta muito útil para caracterização de diferentes tipos litológicos (exemplo: granitos indiferenciados), e identificação de possíveis novos alvos exploratórios e outras análises pertinentes.

Referências

- ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil), 2021. Atlas águas: segurança hídrica do abastecimento urbano. Brasília
- Angelo, T. V., Sousa, G. E. de, & Cunha, L. S. da. (2019). Conceptual Geological Model of the Ribeirão Tortinho Watershed, Federal District of Brazil (Modelo geológico conceitual da Bacia do Ribeirão Tortinho, Distrito Federal, Brasil). *Revista Brasileira De Geografia Física*, 12(2), 592–607. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v12.2.p592-607>.
- Aureliano, T., & Ghilardi, A. M. (2024). Mapeamento da Borda Sul-Sudeste da Bacia do Araripe com auxílio de gamaespectrometria e magnetometria. *Geologia USP. Série Científica*, 24(1), 73-85. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v24-211171>.
- Ayer, J. E. B., Lämmle, L., Mincato, R. L., Donadio, C., Avramidis, P., & Pereira, S. Y. (2024). Three-dimensional model and environmental fragility in the Guarani Aquifer system, SE-Brazil. *Groundwater for Sustainable Development*, 26, 101285. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101285>.
- Básico, A. N. de Á. e S. (Org.). (2021). Atlas águas: Segurança hídrica para abastecimento urbano. Ana.
- Ben Saad, E.; Ben Alaya, M.; Taupin, J.-D.; Patris, N.; Chaabane, N.; Souissi, R (2023). A Hydrogeological Conceptual Model Refines the Behavior of a Mediterranean Coastal Aquifer System: A Key to Sustainable Groundwater Management (Grombalia, NE Tunisia). *Hydrology*, v. 10, p. 180. <https://doi.org/10.3390/hydrology10090180>.
- Bessa, M. da R. M., & Campos, J. E. G. (2023). Perda de Captações Subterrâneas e Monitoramento e Avaliação Hidrogeológica em áreas afetadas pelo enchimento e operação de Reservatórios de Hidrelétricas. *Revista Brasileira De Geografia Física*, 16(3), 1272–1287. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.3.p1272-1287>.
- Borges, Geovane de Barros; CAMPOS, José Eloi Guimarães; SOUZA RODRIGUES, Drielly. Avaliação das Condições de Recarga dos Aquíferos e Análise da Eficiência de Estruturas de Contenção de Sistemas de Drenagem Urbana na Região do Parque Ecológico Veredinha, Brazlândia, Distrito Federal. *Revista Brasileira de Geografia Física*, [S. l.], v. 18, n. 2, p. 1411–1425, 2025. DOI: 10.26848/rbgf.v18.2.p1411-1425.
- Briganti, A., Voltaggio, M., Rainaldi, E., & Carusi, C. (2024). Vertical Light Non-Aqueous Phase Liquid (LNAPL) distribution by Rn prospecting in monitoring wells. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(1), 19. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-12154-0>.
- Brito, Higor Costa de; Alexandra Alves Rufino, Iana. Interrelações entre LULC e recursos hídricos no Semiárido Brasileiro: uma análise sistemática e bibliométrica. *Revista Brasileira de Geografia Física*, [S. l.], v. 18, n. 2, p. 1426–1444, 2025. DOI: 10.26848/rbgf.v18.2.p1426-1444.
- Carvalho, L. G. (2023). Avaliação da Potenciometria e Identificação de Divisores Hidrogeológicos do Sistema Aquífero Urucuia Central com uso de Interpolação por Krigagem. *Revista Brasileira De Geografia Física*, 16(1), 567–583. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.1.p567-583>.
- Casagrande, Matheus Felipe Stanfoca et al (2024). The use of in situ Gamma-Ray Spectrometry to Assess the Environmental Impacts of Intensive Agriculture in terms of Geochemical Mobility in soil and waters. *Geofísica Internacional*, v. 63, n. 2, p. 851-864. https://www.researchgate.net/profile/Cesar-Moreira/publication/379569082_The_use_of_in_situ_Gamma-Ray_Spectrometry_to_Assess_the_Environ

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Departamento de Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais no IGC/UFGM. E o primeiro autor é apoiado por bolsa de pesquisa da FAPEMIG.

- mental_Impacts_of_Intensive_Agriculture_in_t
erms_of_Geochemical_Mobility_in_soil_and_
waters/links/660f2e44b839e05a20bd7a8b/The-
use-of-in-situ-Gamma-Ray-Spectrometry-to-
Assess-the-Environmental-Impacts-of-
Intensive-Agriculture-in-terms-of-
Geochemical-Mobility-in-soil-and-waters.pdf.
Acesso em: 24 out. 2024.
- Chicri, Tainara Silveira Leal; Caminha, Alice Raquel; Sousa Cavalcanti, Ricardo; Silveira Thebaldi, Michael; Rodrigues Oliveira, Leyser; ANTÔNIO SILVA, Vladimir. Características Físicas e Hidráulicas de Bacias de Retenção Implementadas Pelo Programa “Vida Nova Rio Formiga”. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 18(2), 1445–1464. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v18.2.p1445-1464>.
- COPASA. Companhia de Saneamento de Minas Gerais, 2016. DTE/SPMA/DVHD. Disponibilidades hídricas subterrâneas como subsídio ao plano diretor de abastecimento da região metropolitana de Belo Horizonte-RMBH. Diagnóstico e prognósticos do uso das águas subterrâneas para o sistema de abastecimento da RMBH. Belo Horizonte.
- Cordeiro, D., & Pereira, A. (2023). Determinação de domínios gammaradiométricos como ajuda ao levantamento litológico e na selecção de zonas de concentração de elementos radioactivos, leste de Benguela e oeste do Huambo – sw da Angola. *Revista Angolana De Geociências*, 2(1), 212–221.
- D’Affonseca, Fernando M.; Finkel, Michael; Cirpka, Olaf A (2020). Combining implicit geological modeling, field surveys, and hydrogeological modeling to describe groundwater flow in a karst aquifer. *Hydrogeology Journal*, v. 28, n. 8, p. 2779-2802. <https://e-docs.geo-leo.de/bitstream/handle/11858/10677/s10040-020-02220-z.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 24 out. 2024.
- Dutra, Luiz Fernandes (2024). Evolução do sistema mineral IOCG-níquel hidrotermal do Cinturão Sul do Cobre, Província Carajás, com base em análises de LA-ICP-MS in situ aplicadas a estudos geocronológicos e de química mineral. *Tese de Doutorado*. Universidade de São Paulo. https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44137/tde-12072024-071106/publico/Tese_LuizDutra_reduzida.pdf. Acesso em: 22 ago. 2024.
- Echeverria Herrera, I. L. I.; Pereira da Silva Filho, E.; Herrera de Figueiredo Iza, E. R.; Coimbra Horbe, A. M.; Moura dos Santos, S. L.; Nisinga Cabral, L (2020). Técnica booleana aplicada à identificação de crostas lateríticas no sudoeste da amazônia brasileira. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, [S. l.], v. 18, n. 2, 2017. DOI: 10.20502/rbgf.v18i2.1182.
- Esri Inc. (2016). ArcMap (version 10.5. 1). Software. Redlands, Estados Unidos, 2016.
- Foody, G. M. (2020). Explaining the unsuitability of the kappa coefficient in the assessment and comparison of the accuracy of thematic maps obtained by image classification. *Remote Sensing of Environment*, 239, 111630. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111630>.
- Felix, V. S., & Ribeiro Neto, A. (2025). Hydrological modeling of LULC and climate change scenarios in a hydrographic basin in the semiarid region of Brazil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 18(2), 1364–1383. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v18.2.p1364-1383>
- Gonçalves, J. A. C., & Almeida, M. S. L. (2024). Avaliação do potencial hídrico de uma bacia hidrográfica considerando as interações entre águas superficiais e subterrâneas. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 17(6), 4492–4513. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.6.p4492-4513>.
- Gusarov, A. V., Sharifullin, A. G., Beylich, A. A., & Lisetskii, F. N. (2025). Cesium-137 Distribution Patterns in Bottom Sediments of Beaver Ponds in Small Rivers in the North of the Volga Upland, European Russia. *Water*, 17(4), 503. <https://doi.org/10.3390/w17040503>.
- Iza E Herrera, I. L., Pereira Da Silva Filho, E., Herrera De Figueiredo Iza, E. R., Coimbra Horbe, A. M., Moura Dos Santos, S. L., & Nisinga Cabral, L. (2017). TÉCNICA BOOLEANA APLICADA À IDENTIFICAÇÃO DE CROSTAS LATERÍTICAS NO SUDOESTE DA AMAZÔNIA BRASILEIRA. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 18(2). <https://doi.org/10.20502/rbgf.v18i2.1182>.

- Jimenez-Martinez, J. (2023). From the Mental to the Conceptual Model: The Challenge of Teaching Hydrogeology in the Field. *Groundwater*, 61(6), 768–771. <https://doi.org/10.1111/gwat.13355>.
- Kinoti, I., Leblanc, M., Lekula, M., Tweed, S., Kenabatho, P. K., Olioso, A., & Lubczynski, M. W. (2024). Hydrogeological conceptual model of Stampriet transboundary aquifer system in Southern Africa. *Groundwater for Sustainable Development*, 26, 101301. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101301>.
- Lachassagne, P., Dewandel, B., & Wyns, R. (2021). Review: Hydrogeology of weathered crystalline/hard-rock aquifers—guidelines for the operational survey and management of their groundwater resources. *Hydrogeology Journal*, 29(8), 2561–2594. <https://doi.org/10.1007/s10040-021-02339-7>.
- Lopes, F. A., Castro, P. D. T. A., Lana, C. E., & Dias, R. C. (2021). Identificação dos leques aluviais dissecados do Quadrilátero Ferrífero (MG) através de critérios espaciais e sedimentológicos. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 14(3), 1296–1311. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.3.p1296-1311>.
- Lupinacci, C. M., Stefanuto, E. B., & Magalhães, D. M. D. (2025). Cartografia Geomorfológica em Imagens de Altíssima Resolução: Uma proposta para sistemas erosivos lineares. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 18(2), 1493–1505. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v18.2.p1493-1505>.
- Macêdo Filho, H. F. D., Azevedo, J. A. D., Alves, I. M., Ferreira, A. A., & Salomão, M. S. (2021). ASSINATURAS RADIOATIVAS NA SEDIMENTAÇÃO DA PORÇÃO CONTINENTAL DA BACIA DE CAMPOS - RJ. Em R. J. D. Oliveira & R. C. Moreira, Recursos Naturais: Energia de Biomassa Florestal (1o ed, p. 13–21). Editora Científica Digital. <https://doi.org/10.37885/210203128>.
- Marques, J. M., Carreira, P. M., Caçador, P., & Antunes Da Silva, M. (2024). Update of the Interpretive Conceptual Model of Ladeira de Envendos Hyposaline Hydromineral System (Central Portugal): A Contribution to Its Sustainable Use. *Sustainability*, 16(12), 5179. <https://doi.org/10.3390/su16125179>.
- Martins, A. M., Filgueira, H. J. A., Azevedo Filho, A. C. D., Silva, T. C. D., & Silva Júnior, M. H. D. (2020). Análise de não Homogeneidades de Séries de Vazão de Captações de Nascentes na Bacia Hidrográfica do Rio Gramame, PB, Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 13(6), 2896–2907. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.6.p2896-2907>.
- Martins, J. A., Silva, F. E., Costa, E., Toni, L. H. M. C., & Silva, L. S. C. D. (2025). Análise do Método Geofísico de Eletrorresistividade como Ferramenta no Planejamento Urbano de Áreas Cársticas no Município de Almirante Tamandaré—PR. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 18(2), 940–954. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v18.2.p940-954>.
- Medeiros Da Silva, E. G., Lordsleem Júnior, A. C., & Cabral, J. J. D. S. P. (2025). Inspeção em Reservatórios Elevados de Água com Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT): Revisão sistemática da literatura. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 18(2), 1384–1410. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v18.2.p1384-1410>.
- Mendonça, B. A. F. D., Fernandes Filho, E. I., Assis, L. M. D., Schaefer, C. E. G. R., Brandão, P. C., Faria, M. M., Santos, E. E. D., & Pereira, A. F. S. (2019). Mapping vegetation on ferruginous substrates using ASTER and gamma-spectrometry images in the Iron Quadrangle, Minas Gerais. *Revista Árvore*, 43(4), e430406. <https://doi.org/10.1590/1806-90882019000400006>.
- Neves, Joanna Maria da Cunha de Oliveira Santos; Silva De Lima, Nathália; Ribeiro, Gean Carlos; Nascimento De Souza, Geovana; Santos DE JESUS, Maikete; Monteiro Neves, Frederico. Estudo da Biogeoquímica e Caracterização de Fontes de Elementos Químicos para Águas Fluviais de Pequenas Bacias Hidrográficas: Estudo de Caso do Parque Nacional do Descobrimento, Bahia, Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, [S. l.], v. 18, n. 2, p. 1506–1522, 2025. DOI: 10.26848/rbgf.v18.2.p1506-1522.
- Nunes, Nivalda da Costa; PERES ANGELINI, Lucas; ALVES, Wellmo dos Santos; MORAES CASTRO, Raysa; ALVES MORAIS, Wilker; GIROTTO MORAIS,

- Nicolý. Análise espaço-temporal da erosão hídrica por meio de modelagem e geotecnologias em bacias hidrográficas no Centro-Oeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 18(2), 1465–1492. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v18.2.p1465-1492>.
- Novikov, D. A., Pyryaev, A. N., Sukhorukov, V. P., Maksimova, A. A., Derkachev, A. S., Sukhorukova, A. F., Dultsev, F. F., Chernykh, A. V., Khvashchevskaya, A. A., & Medeshova, N. A. (2024). Role of the Water–Rock System in the Formation of the Composition of Radon Water of the Tulinskoe Field (Novosibirsk). *Russian Geology and Geophysics*, 65(12), 1503–1518. <https://doi.org/10.2113/RGG20244716>.
- Oliveira, Joanna Maria Da Cunha De, Silva De Lima, N., Ribeiro, G. C., Nascimento De Souza, G., Santos De Jesus, M., & Monteiro Neves, F. (2025). Study of Biogeochemistry and Characterization of Chemical Element Sources in River Waters of Small Watersheds: A Case Study of the Descobrimento National Park, Bahia, Brazil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 18(2), 1506–1522. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v18.2.p1506-522>.
- Peach, D., & Taylor, A. (2024). The development of a hydrogeological conceptual model of groundwater and surface water flows in the Silala River Basin. *WIREs Water*, 11(1), e1676. <https://doi.org/10.1002/wat2.1676>.
- Ribeiro, V. B., Mantovani, M., & Louro, V. H. A. (2015). Aerogamaespectrometria e suas aplicações no mapeamento geológico. *Terrae Didática*, 10(1), 29. <https://doi.org/10.20396/td.v10i1.8637386>.
- Santos, V. S., & Lorandi, R. (2017). Características Hidrogeológicas e Vulnerabilidade à Contaminação das Unidades Aquíferas da Bacia Hidrográfica dos Córregos Amaral e Brilhante—Jacara (MT) (Hydrogeological features and vulnerability to contamination of aquifer units in ...). *Revista Brasileira de Geografia Física*, 10(5), 1624. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v10.5.p1624-1637>.
- Salvanus Yevalla, G.-M., Rodrigue, E. S., Ndo, N. E., & Tabod, T. C. (2024). Characterization of subsurface geology and hydrogeology in Kribi - Cameroon using electrical resistivity soundings and 3D-Implicit modelling: Baseline for groundwater resource management. *Groundwater for Sustainable Development*, 25, 101163. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101163>.
- Shibetskaia, I. G., Razina, V. A., Bezhin, N. A., Tokar', E. A., Turyanskiy, V. A., Zarubina, N. V., Shichalin, O. O., Yarusova, S. B., & Tananaev, I. G. (2025). Sorbents Based on Polyacrylonitrile Fiber for Complex Recovery of Artificial 137Cs and Natural Radionuclides from Natural Media. *Water*, 17(2), 147. <https://doi.org/10.3390/w17020147>.
- Silva, G. F. D. (2014). INTERPRETAÇÃO GEOLÓGICA E GEOFÍSICA DA ÁREA DE INFLUÊNCIA DA USINA HIDRELÉTRICA DE IRAPÉ, MG. Unpublished. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.22591.92321>.
- Silva, E. M. S., Cangiano, M. R., Da Cunha, L. S., & Guiguer, N. (2019). CONDICIONANTES PARA ELABORAÇÃO DE UM MODELO CONCEITUAL HIDROGEOLÓGICO DA SUB-BACIA DO RIBEIRÃO RODEADOR, BACIA DO RIO DESCOBERTO/DF, COMO FERRAMENTA PARA A GESTÃO INTEGRADA DE RECURSOS HÍDRICOS (Conditioning factors for the elaboration of a hydrogeological conceptual model of the Ribeirão Rodeador subwatershed, Descoberto watershed river, Distrito Federal, as a tool for the integrated water resources management). *Revista Brasileira de Geografia Física*, 12(4), 1635–1648. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v12.4.p1635-1648>.
- Silva, Everton Gabriel Medeiros da; LORDSLEEM JÚNIOR, Alberto Casado; CABRAL, Jaime Joaquim da Silva Pereira. Inspeção em Reservatórios Elevados de Água com Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT): revisão sistemática da literatura. *Revista Brasileira de Geografia Física*, [S. l.], v. 18, n. 2, p. 1384–1410, 2025. DOI: 10.26848/rbgf.v18.2.p1384-1410.
- Sotero, M. P., Tolentino, E. J. T., Oliveira, S. A. M. de, & Sant'Ana, L. P. (2019). Mapa Geológico da Região Metropolitana de Belo Horizonte/MG [Geológico]. Serviço Geológico do Brasil/CPRM. <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/21485>.

- Sperandio, H. V., Alvarenga Almeida, R., Piuzana Mucida, D., Bastos Gorgens, E., Dos Santos Silva, A. V., Roldi Guariz, H., Dias Dos Santos, J., Ribeiro Aguiar, G., Soares De Moura, M., & Brasil Ferreira Pinto, D. (2025). Environmental Modeling for Watershed-based Territorial Planning. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 18(2), 1028–1041. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v18.2.p1028-1041>.
- Stanfoca Casagrande, M. F., Moreira, C. A., Moreira Furlan, L., & Rosolen, V. (2024). The use of in situ Gamma-Ray Spectrometry to Assess the Environmental Impacts of Intensive Agriculture in terms of Geochemical Mobility in soil and waters. *Geofísica Internacional*, 63(2), 851–864. <https://doi.org/10.22201/igeof.2954436xe.2024.63.2.1711>.
- Purificação, Robson & Santos, Daniel & Vasconcelos, Marcos & Sena, Florivaldo (2016). Aplicação de aerogamaespectrometria no mapeamento de corpos máficos e ultramáficos associados a mineralizações de cobre no norte da Bahia. *Proceedings of the 7 Simpósio Brasileiro de Geofísica*, 1–5. <https://doi.org/10.22564/7simbgf2016.012>.
- Valões, D. C. P., Cabral, J. J., De Almeida, S. M., Pedrosa, A. D. A., Da Silva, S. R., & Do Nascimento, C. F. G. (2022). Análise do zoneamento explotável de água subterrânea como instrumento de gestão na Bacia Sedimentar de São José do Belmonte-PE. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 15(4), 1863–1880. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.4.p1863-1880>
- Vincent, A., Daigre, C., Fischer, O., Aðalgeirsdóttir, G., Violette, S., Hart, J., Guðmundsson, S., & Pálsson, F. (2024). A hydrogeological conceptual model of aquifers in catchments headed by temperate glaciers. *Hydrology and Earth System Sciences*, 28(14), 3475–3494. <https://doi.org/10.5194/hess-28-3475-2024>.
- Yevalla, Gah-Muti Salvanus et al (2024). Characterization of subsurface geology and hydrogeology in Kribi-Cameroon using electrical resistivity soundings and 3D-Implicit modelling: Baseline for groundwater resource management. *Groundwater for Sustainable Development*, v. 25, p. 101163. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101163>.